新型抗弯扭钻杆接头螺纹力学性能及仿真分析

陈波,林春花

(西南石油大学机电工程学院,610500 成都)

摘　要:由于API螺纹抗弯扭性能较差,导致接头螺纹的使用寿命会低于其设计寿命。以API NC50钻杆接头螺纹为例,通过改变API螺纹台阶面结构来增强API螺纹的抗扭性能。首先,通过万能材料试验机得到了35CrMo的材料性能参数,建立螺纹材料的本构模型;其次,基于材料本构模型建立了钻杆接头螺纹有限元分析模型,并验证了该分析模型的准确性;最后,分析了钻杆接头螺纹在上扣载荷、上扣+压缩载荷和上扣+压缩+弯曲载荷下的螺纹牙应力场情况。分析结果表明:梯形台阶面结构能够有效改善接头螺纹扭矩的分布,使螺纹牙所承受的扭矩值降低了50%;在上扣+压缩载荷工况下,螺纹牙上最大应力总体变化趋势为随着压缩载荷增加而不断降低,且梯形台阶面螺纹牙上的最大应力低于API螺纹结构;当增加弯曲载荷后,钻杆外螺纹螺纹牙应力均随着井眼曲率的增加而增加,但未超过材料的最大屈服极限,梯形台阶面螺纹牙应力也低于API螺纹。

关键词:钻杆螺纹;梯形台阶面;上扣扭矩;井眼曲率;有限元分析

中图分类号:TE921　　　　**文献标志码:**A

Thread ability and simulation of a new type of anti-bending and torsion drill pipe joint

CHEN Bo,LIN Chunhua

(School of Mechanical Engineering,Southwest Petroleum University,610500 Chengdu,China)

Abstract: Due to the poor torsion resistance of API thread,the service life of joint thread will be lower than its design life. In this paper,taking API NC50 drill pipe joint thread as an example,the anti-torsion performance of API thread was enhanced by changing the structure of API thread step surface. Firstly,the material performance parameters of 35CrMo were obtained by universal material testing machine,and the constitutive model of thread material was established. Then,based on the material constitutive model,the finite element analysis model of drill pipe joint thread was established,and the accuracy of the analysis model was verified. Finally,the stress field of drill pipe joint thread under make-up load,make-up + compression load and make-up + compression + bending load were analyzed. The results show that the trapezoidal step surface structure can effectively improve the torque distribution of the joint thread and reduce the torque value of the thread by 50%;under the condition of make-up + compression load,the overall variation trend of the maximum stress on the thread continuously decreases with the increase of the com-

收稿日期:2020-08-25　　　　**修回日期:**2021-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51905458)

通信作者:陈波,教授。E-mail:1530982768@qq.com

引用格式:陈波,林春花. 新型抗弯扭钻杆接头螺纹力学性能及仿真分析[J]. 应用力学学报,2022,39(1):155-162.

CHENG Bo,LIN Chunhua. Thread ability and simulation of a new type of anti-bending and torsion drill pipe joint[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(1):155-162.

pression load, and the maximum stress on the thread tooth of the trapezoidal step surface is lower than that of the API thread structure; when the bending load is increased, the maximum stress on the thread tooth of the trapezoidal step surface is lower than that of the API thread structure After that, the thread tooth stress of drill pipe female joint increases with the increase of dogleg degree, but it does not exceed the maximum yield limit of the material, and the thread tooth stress of trapezoidal step surface is also lower than that of API thread.

Key words: drill pipe thread; trapezoidal step surface; make-up torque; dogleg degree; finite element analysis

近年来,国内外油气开采中广泛使用水平井、定向井和大位移井等特殊井进行油气开采,研究发现,在这些井型结构都存在着弯曲井眼段,当钻杆在通过弯曲井眼段时,钻杆在弯曲井壁的作用下会产生较大的挠度,同时钻杆在轴向压缩、扭矩和弯曲等复合载荷作用下,使得钻杆的接头螺纹成为整个钻杆的最薄弱环节[1-4]。据统计,国内高达 86% 钻杆失效事故发生在螺纹连接处,且大部分失效原因是由于螺纹断裂失效所造成的[5-6]。所以,设计出一种能够适应较大井眼曲率的新型高抗弯扭螺纹,对提高钻杆接头螺纹的寿命是具有积极意义的。

国内外专家学者对钻杆接头做了大量的研究。文献[7]根据钻杆接头受扭时的变形协调关系,设计出了一种适用于大位移井的高抗扭双台肩钻杆,并基于正交优化方法对接头螺纹的关键参数进行优化,获得了该钻杆接头螺纹关键结构参数的最优组合。文献[8]建立了 API 短圆套管螺纹连接的三维计算模型,并研究了拉弯复合载荷对螺纹的应力分布的影响规律,分析指出井眼曲率(弯矩)对螺纹应力状态影响极大。文献[9]也对井眼弯曲段 API 油套管长圆螺纹进行分析,分析发现井眼弯曲率也是影响油套管螺纹失效的重要因素之一。针对钻杆接头螺纹因扭矩过大导致失效的问题,文献[10]设计了一种超高抗扭钻杆接头螺纹结构,并分析了该螺纹结构在扭矩、拉压载荷和弯曲载荷等作用下的应力场情况。通过分析,该结构的抗扭性能比 API 螺纹结构提高了 50%。文献[11-12]设计了一种新型双台阶面螺纹结构。与常规结构相比,该新型结构增加了外螺纹圆柱面和内螺纹圆柱孔部分的长度,从而提高钻杆的抗扭能力。此外,该作者还设计了一种斜面台阶面结构,提高钻杆螺纹的密封效果。文献[13]研究发现钻杆接头两端螺纹所受接触力大于中间部位螺纹接触力,当钻杆弯曲变形时,其接头螺纹的最大等效应力位于螺纹大端第 1 有效接触螺纹牙处。

本文以传统单台阶 API 螺纹研究为基础,通过改变传统螺纹所受载荷的分配比例提高钻杆螺纹的抗弯扭性能。本文设计了一种新型钻杆接头螺纹结构,并利用有限元分析软件对梯形台阶面螺纹的接头的应力分布规律进行研究。

1　梯形台阶面螺纹设计

钻杆内外接头螺纹在上扣扭矩的作用下啮合连接。在外部载荷的作用下,钻杆接头螺纹牙与台阶面接触面会产生摩擦力矩,其螺纹牙上的扭矩 T_P、台阶面上的扭矩 T_T 与外部扭矩 T 满足如下关系。

$$T = T_P + T_T \tag{1}$$

由式(1)可知,在外部载荷不变的情况下,台阶接触面会帮螺纹牙接触面分担一部分载荷;当增加台阶接触面上的扭矩时,螺纹牙上受到的扭矩会降低,这样有助于降低螺纹牙的失效风险。上扣扭矩施加前的状态为台阶面接触而不受力,此时在台阶面设置凸起,当上扣扭矩作用到台阶面时,会使台阶面承受较大的扭矩载荷,那么螺纹牙上的载荷就会降低。在承受弯矩载荷时,台阶面的凸起则会先于螺纹牙受到压缩或拉伸载荷,也会减少螺纹牙所受载荷比例。故本文对传统钻杆接头螺纹结构进行改进,将平台阶面改为梯形台阶面,使得台阶面所承受的载荷增加,更好地分担扭矩载荷,其他螺纹结构参数与 API 螺纹相同,结构如图 1 所示。

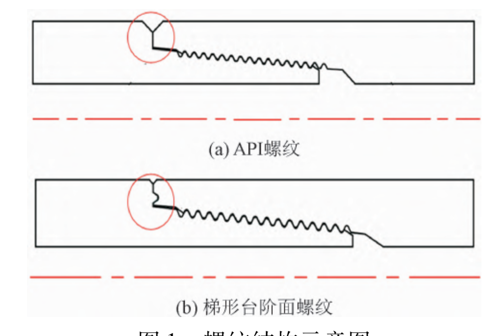


图 1　螺纹结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of thread

2 建立有限元分析模型

2.1 材料拉伸试验

常用钻头接头螺纹材料为35CrMo，所以选用同种材料在万能试验机进行材料拉伸试验，并按照国标GB/T 228—2002[14]的规定对试件进行测试，从而得到材料的弹性模量、泊松比和屈服强度等材料参数。试验设备和试件如图2所示，根据试验结果处理得到试验数据如表1所示。对结果数据进行分析，确定材料的弹性模量为214 MPa，泊松比为0.1，屈服强度为671.8 MPa。



(a) 试验试件



(b) 材料试验机

图2 现场试验图片

Fig. 2 Pictures of field experiment

表1 试验参数数据表

Tab. 1 Data table of experimental parameters

编号	1	2	3	4	5
直径/mm	9.98	9.92	9.96	9.98	9.92
面积/mm^2	78.22	77.28	77.91	78.23	77.28
屈服强度/MPa	635	624	657	724	719
弹性模量/MPa	212.9	212.1	212.1	216.0	216.9

2.2 建立有限元模型

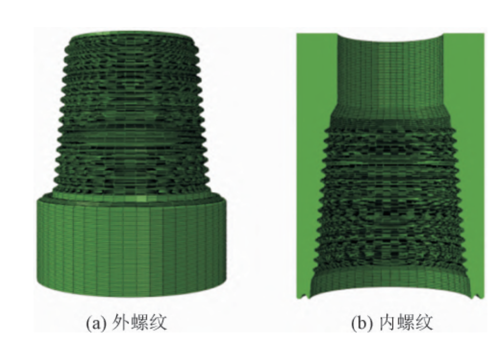
本文基于ABAQUS有限元分析软件，采用某油田钻杆螺纹参数建立有限元模型，其参数如表2所示。

在分析外部载荷对螺纹的影响规律时，为了提高其分析效率，可根据螺纹结构和受力特点对螺纹模型进行假设和简化，并将材料视为各向同性[11]。建立的钻杆接头螺纹有限元模型如图3所示。模型采用六面体网格进行划分，并对螺纹牙进行局部布种，细化螺纹牙接触面网格，提高计算精度。螺纹网格类型为C3D8R，外螺纹网格数量为204 900，内螺纹网格数量为250 600。模型的本构模型参数为材料拉伸试验的结果。

表2 钻杆接头螺纹参数表

Tab. 2 Data sheet of drill pipe joint thread parameters

参数	数值
螺纹牙型	V-0.038*R*
螺距/mm	6.35
锥度	1:6
外螺纹大端直径/mm	133.35
外螺纹根部圆柱直径/mm	130.42
外螺纹小端直径/mm	114.30
外螺纹锥部长度/mm	114.30
内螺纹有效螺纹长度/mm	117.48
内螺纹锥部长度/mm	130.18
内螺纹大端直径/mm	128.07



(a) 外螺纹 (b) 内螺纹

图3 螺纹有限元模型

Fig. 3 Thread finite element model

2.3 分析步与约束条件

为模拟钻杆螺纹接头在上扣+压缩+弯曲载荷下的力学行为，需设定多个分析步。首先，设定螺纹接触面装配过盈以满足上扣需求，针对NC50型螺纹，API推荐最佳上扣扭矩10.301 kN·m；其次，依次对钻杆施加50 kN、100 kN及200 kN的压缩载荷F_C，分析压扭载荷下的螺纹牙受力情况；而后，对钻杆螺纹内螺纹接头施加平行于其上端面的径向力来模拟钻杆受弯情况，施加的径向力大小分别对应井眼曲率10 (°)/30 m、20 (°)/30 m、30 (°)/30 m、40(°)/30 m。根据实际情况，在整个分析中对钻杆接头外螺纹下端面完全约束，其约束条件施加情况如图4所示。

为了更好地计算出螺纹在不同井眼曲率情况下所受弯矩与等效径向力的关系，将螺纹接头简化为一端固定，一端受弯曲载荷作用的悬臂梁，如图5所示。

图 4　约束条件设置情况

Fig. 4　Constraint setting

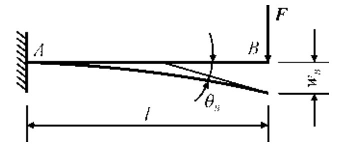


图 5　悬臂梁结构示意图

Fig. 5　Schematic diagram of simply supported beam structure

由材料力学中梁在简单载荷作用下的变形可知,端面转角为

$$\theta_B = -\frac{Fl^2}{2EI} \tag{2}$$

式中:θ_B 为端面最大转角,rad;F 为端面所受的弯曲载荷,N;l 为螺纹接头整体长度尺寸,mm;E 为材料弹性模量,MPa;I 为螺纹接头横截面对中性轴惯性矩,其表达式为

$$I = \frac{\pi D^4}{64}(1-\alpha^4) \tag{3}$$

式中:D 为接头外径;$\alpha = d/D$,mm^4;d 为接头内径。整理式(2)得到端截面转角与弯曲载荷作用的关系如下。

$$F = -\frac{2\theta_B EI}{l^2} \tag{4}$$

在工程实际中,井眼曲率表示井眼弯曲的程度,其与端面转角的关系为:井眼曲率 $= \theta_B \pi/30$ m,计算得到不同井眼曲率对应的弯曲载荷如表 3 所示。

表 3　不同井眼曲率下弯曲载荷

Tab. 3　Bending load under different borehole curvature

井眼曲率/((°)·(30 m)$^{-1}$)	弯曲载荷/kN
0	0
10	15.0
20	27.9
30	42.0
40	56.1

2.4　有限元分析方法验证

为确保有限分析结果的准确性,根据文献[7]中有限元模型验证方法,并采用前文有限元模型建立方法,建立与文献[15]中试验规格相同的 API 套管圆螺纹套管接头有限元模型。根据试验中的加载条件,施加轴向载荷为 1 200.96 kN,有限元计算得到接头螺纹应力和试验得到的应力如图 6 所示。从图 6 中可以看出,试验结果与仿真结果趋势一致,误差较小。从而说明利用有限元分析方法对螺纹受力进行分析符合工程实际。

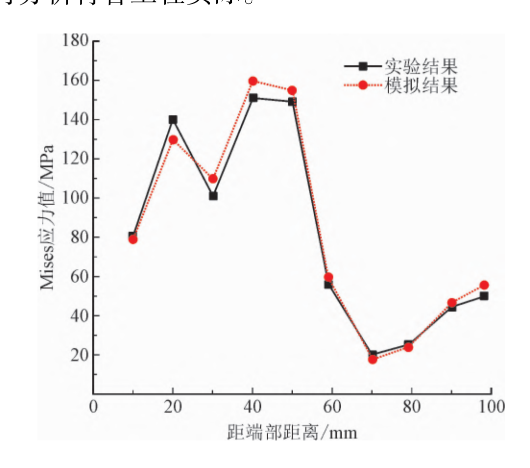


图 6　试验结果与有限元结果对比图

Fig. 6　Comparison between experimental results and finite element results

3　有限元结果分析

本文设定了 3 种载荷模式进行螺纹受力有限元分析:模式Ⅰ为上扣状态;模式Ⅱ为上扣 + 压缩复合载荷状态;模式Ⅲ为上扣 + 压缩 + 弯曲复合载荷状态。为了更好地分析各螺纹牙的受力情况,对螺纹牙进行了编号,编号方式如图 7 所示。

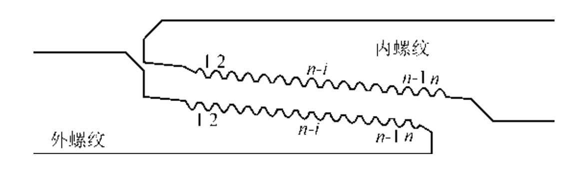


图 7　螺纹牙编号示意图

Fig. 7　Schematic diagram of thread thread number

3.1　模式Ⅰ

图 8 和图 9 为模式Ⅰ状态下接头螺纹牙应力分布曲线和分布云图。

由图 8 可知:API 接头螺纹牙应力分布总体趋势为逐渐降低,其应力分布及变化趋势与文献[10]

中研究结果相同，从而进一步说明该有限元分析模型的准确性；接头螺纹牙最大应力为 137 MPa，为 API 螺纹接触的第一牙上；新型接头螺纹最大应力为 70.3 MPa，也出现在螺纹配合的第一牙上，且比 API 螺纹降低了 49%；新型接头螺纹与 API 接头螺纹应力值均随着螺纹牙序号的增加，应力不断降低。从螺纹牙所承受的扭矩值来看，API 螺纹螺纹牙所承受的扭矩值 6 617 N · m，而新型接头螺纹的螺纹牙扭矩值为 3 500 N · m。从台阶面的受力来看，API 螺纹台阶面应力值为 73 MPa，而梯形台阶面应力值为 191 MPa，虽然大于 API 螺纹，但仍在安全许可范围内。分析结果表明，在上扣状态下新型梯形台阶面螺纹结构能够降低螺纹牙的应力，降低失效风险。

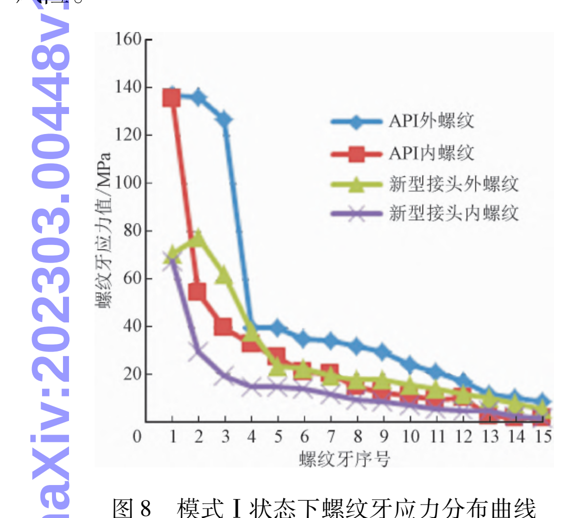


图 8　模式 I 状态下螺纹牙应力分布曲线

Fig. 8　Stress distribution curve of thread under mode Ⅰ

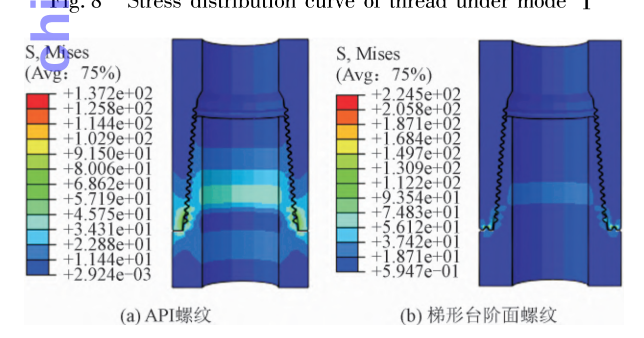


图 9　模式 I 状态下螺纹应力分布云图

Fig. 9　Cloud diagram of thread stress distribution in mode Ⅰ

3.2　模式 Ⅱ

在上扣扭矩状态下，对 API 螺纹结构和梯形台阶面螺纹结构分别施加 50 kN、100 kN 和 200 kN 的压缩载荷，来模拟上扣在拉伸和压缩复合载荷作用下两种结构螺纹的受力情况，结果如图 10 ~ 图 12 所示。

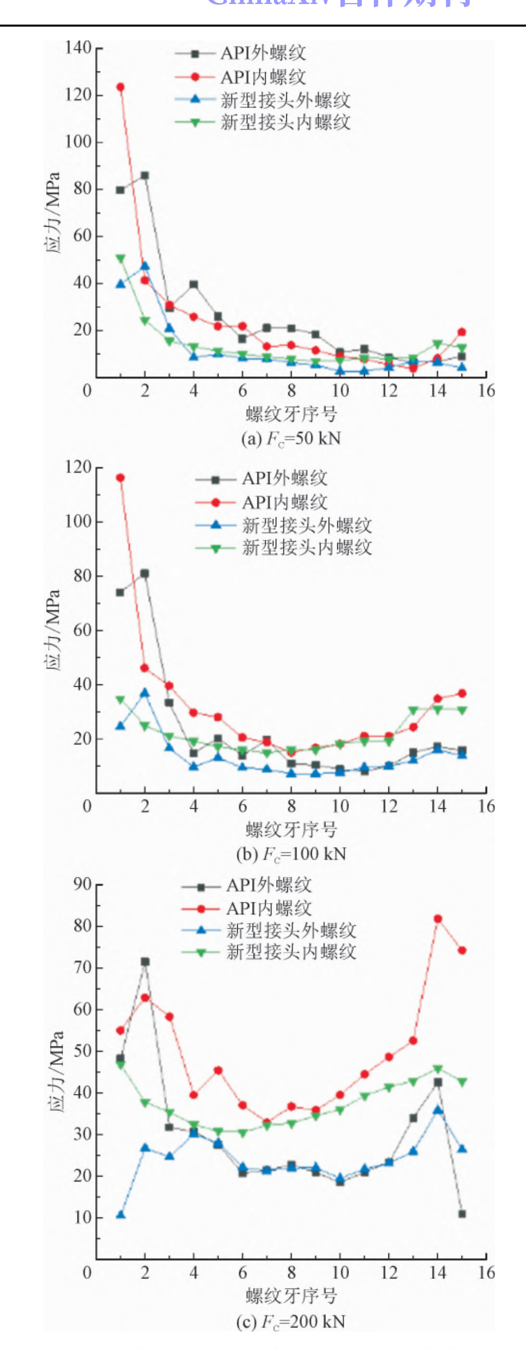


图 10　模式 Ⅱ 状态下螺纹牙应力分布曲线

Fig. 10　Stress distribution curve of thread under Mode Ⅱ

从图 10 中可以发现，在施加 50 kN 的压缩载荷后，API 接头螺纹的最大应力仍出现在内螺纹牙上，为 123.4 MPa；外螺纹的最大应力在 2 号螺纹牙上，为 85.8 MPa；API 接头螺纹最大应力出现位置与上扣状态一致，但螺纹牙应力是随着螺纹牙序号增加而降低。同样，梯形台阶面螺纹结构最大应力出现位置也与上扣状态一致，最大应力在外螺纹牙上，为 50.7 MPa，比 API 螺纹降低了 143.2%。当压缩载荷为 100 kN 时，接头螺纹牙上应力均随着螺纹牙序号增加而不断降低，且螺纹上最大应力也随着压缩载荷增加而降低　　螺纹结构的最大应力值出现

在 1 号螺纹牙上，最大应力值为 116.3 MPa；新型接头螺纹的最大应力值为 212.8 MPa，出现在台阶面上，且新结构的螺纹牙最大应力为 36 MPa，远小于 API 螺纹。当压缩载荷为 200 kN 时，螺纹牙应力分布为中间小、两端大，此时两种结构螺纹的最大应力值均出现在台阶面上，两种螺纹结构的最大应力值分别为 141.6 MPa 和 225 MPa，均符合材料强度要求。通过以上分析可以说明，在压缩载荷工况下（即在承受相同钻压情况下），新型接头螺纹的失效风险低于 API 接头螺纹。

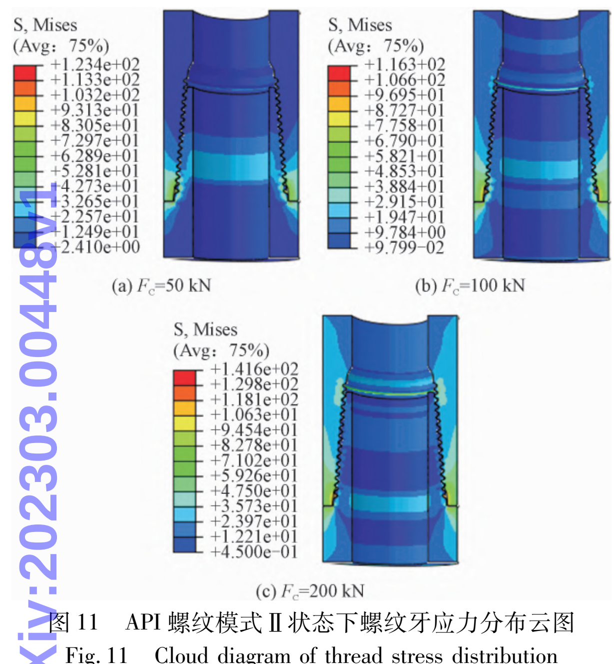


图 11　API 螺纹模式Ⅱ状态下螺纹牙应力分布云图

Fig. 11　Cloud diagram of thread stress distribution under API thread mode Ⅱ

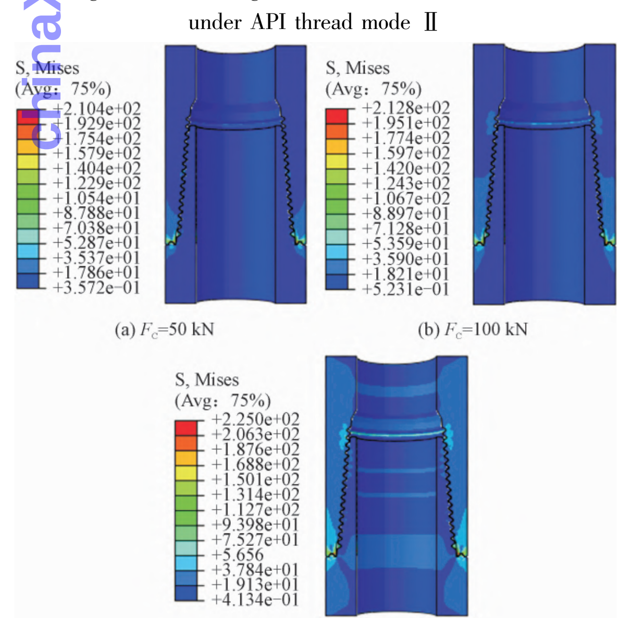


图 12　新型台阶面螺纹模式Ⅱ状态下螺纹牙应力分布云图

Fig. 12　Stress distribution cloud diagram of thread under the condition of new stepped surface thread mode Ⅱ

3.3　模式Ⅲ

同样，新型接头螺纹在模式Ⅲ状态下的应力分布情况如何变化，也需对其进行分析。由上两节分析发现，钻杆接头螺纹应力最大出现在内螺纹上，因此本节主要对钻杆的内螺纹进行分析。分别施加井眼曲率为 10 (°)/30 m、20 (°)/30 m、30 (°)/30 m、40 (°)/30 m，其内螺纹受拉面螺纹牙应力分布曲线如图 13 所示，受压面如图 14 所示，接头应力分布云图如 15 ~ 图 16 所示。

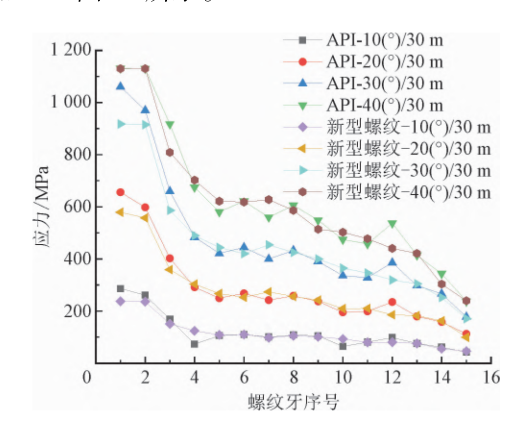


图 13　模式Ⅲ状态下受拉面螺纹牙应力分布曲线

Fig. 13　Stress distribution curve of thread on tension surface under mode Ⅲ

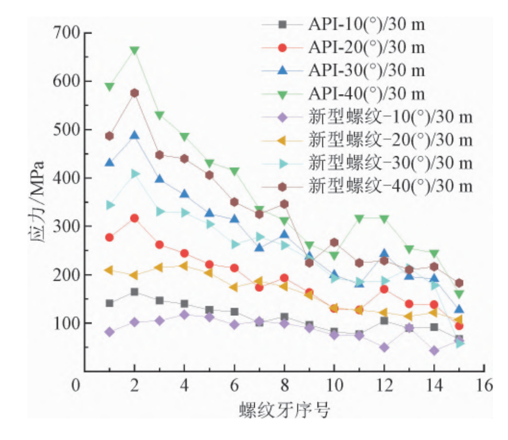


图 14　模式Ⅲ状态下受压面螺纹牙应力分布曲线

Fig. 14　Stress distribution curve of thread on compression surface under mode Ⅲ

从图 13 ~ 图 14 中可知，在复合载荷作用下，新型接头和 API 接头的螺纹牙最大的应力出现在 1、2 号螺纹牙；当井眼曲率低于 10 (°)/30 m 时，新型接头和 API 接头的螺纹牙应力分布较为平缓；但当井眼曲率大于 10 (°)/30 m 后，新型接头和 API 接头的螺纹牙应力水平逐渐降低。在弯曲载荷作用下，接头螺纹可分为受拉面和受压面；受拉面螺纹由于大

载荷的施加,螺纹牙应力减轻的不明显,在受压面螺纹,新型接头螺纹牙应力水平要明显低于 API 接头螺纹,所以在相同的井眼曲率下,新型接头的螺纹牙的最大 Mises 应力是小于 API 接头螺纹牙,这说明在施加了弯曲载荷后,新型接头螺纹的失效风险要低于 API 接头螺纹。

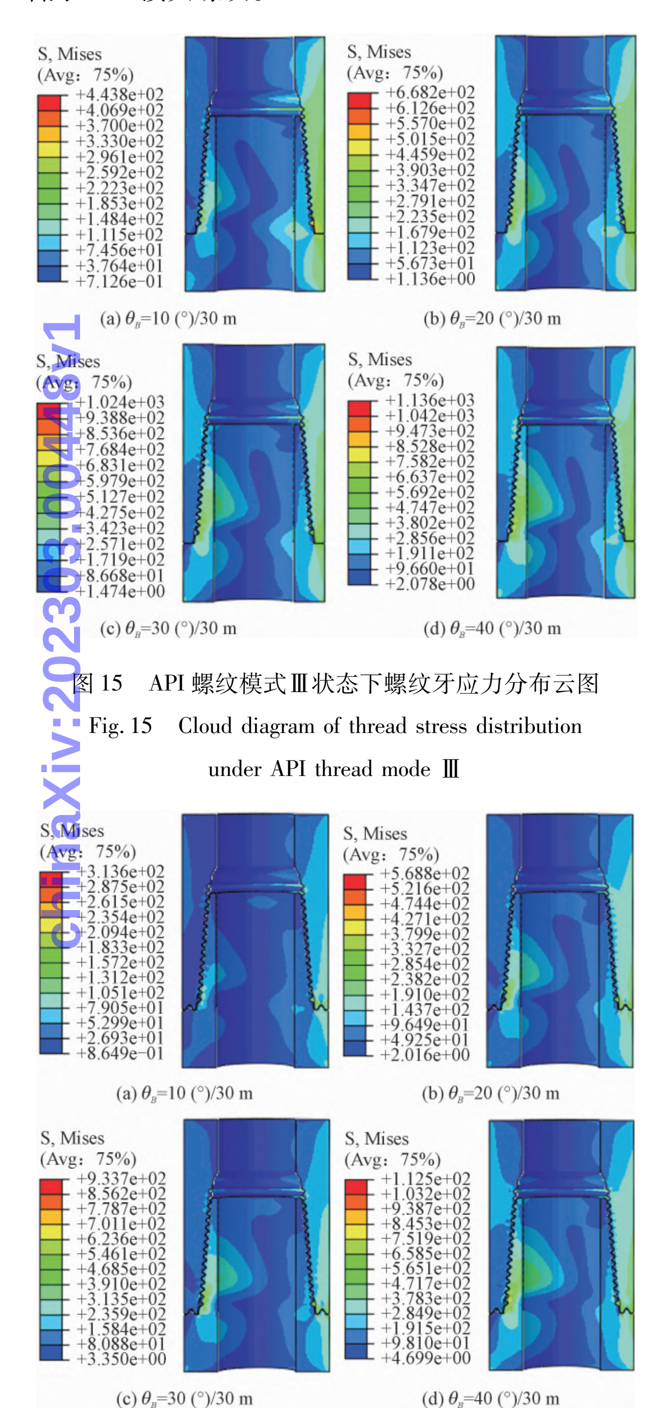


图 15 API 螺纹模式Ⅲ状态下螺纹牙应力分布云图

Fig. 15 Cloud diagram of thread stress distribution under API thread mode Ⅲ

图 16 新型台阶面螺纹模式Ⅲ状态下螺纹牙应力分布云图

Fig. 16 Stress distribution cloud diagram of thread under the condition of new stepped surface thread mode Ⅲ

4 结 论

本文对钻杆接头螺纹进行改进,设计了一种新型梯形台阶面接头螺纹结构;并仿真分析 API 螺纹结构和梯形台阶面螺纹结构在上扣扭矩、上扣 + 压缩载荷和上扣 + 压缩 + 弯曲载荷下,螺纹牙应力变化情况,得到的结论如下。

1)将平台阶面改为梯形台阶面,能够有效降低螺纹牙的扭矩分配,使梯形台阶面螺纹牙所承受的扭矩值降低了 48%。

2)在不同载荷工况下,新型梯形台阶面钻杆接头螺纹上螺纹牙应力值均小于 API 螺纹,且台阶面上的载荷也在材料的强度要求内。所以新型梯形台阶面钻杆接头螺纹的失效风险低于 API 螺纹。

参考文献

[1] 赵恒,罗勇,赵金丰,等. 苏里格气田长水平段水平井快速钻井技术[J]. 钻采工艺,2012,35(6):108-109.(ZHAO Heng,LUO Yong,ZHAO Jinfeng,et al. Rapid drilling technology of horizontal wells in long horizontal section of Sulige gas field[J]. Drilling and production technology,2012,35(6):108-109(in Chinese)).

[2] 鄢裕娟. 大斜度井钻杆在弯曲井眼中的受力分析[J]. 黑龙江科技信息,2012(10):233.(YAN Yujuan. Stress analysis of drill pipe in curved hole of high angle well[J]. Heilongjiang science and technology information,2012(10):233(in Chinese)).

[3] 袁鹏斌,陈锋,王秀梅. 应力释放槽对钻杆接头力学性能的影响[J]. 石油钻探技术,2010,38(3):32-35.(YUAN Pengbin,CHEN Feng,WANG Xiumei. Effects of stress relief groove on drill pipe joints' mechanical performance[J]. Petroleum drilling techniques,2010,38(3):32-35(in Chinese)).

[4] 李鹤林,冯耀荣. 石油钻柱失效分析及预防措施[J]. 石油机械,1990,18(8):38-44.(LI Helin,FENG Yaorong. Failure analysis and protective measures for oil drill strings[J]. China petroleum machinery,1990,18(8):38-44(in Chinese)).

[5] 吴立新,陈平,祝效华,等. 气体钻井钻柱疲劳失效周期分析[J]. 石油钻探技术,2012,40(1):42-46.(WU Lixin,CHEN Ping,ZHU Xiaohua,et al. Contrast of fatigue failure cycles of drill string during gas drilling[J]. Petroleum drilling techniques,2012,40(1):42-46(in Chinese)).

[6] 屈展,王建军. 石油钻铤接头受力与其弯曲强度比的关系讨论[J]. 宁夏工学院学报(自然科学),1996(增刊 1):59-62.(QU Zhan,WANG Jianjun. Mathematical model of the three demensional porosity field[J]. Journal of Ningxia Institute of Technology(natural science),1996(S1):59-62(in Chinese)).

［7］ 祝效华，张智. 大位移井超高抗扭双台肩钻杆接头的设计［J］. 天然气工业，2017，37（4）：89-97.（ZHU Xiaohua，ZHANG Zhi. Design of an ultra-high torque double-shoulder tool joint for extended reach wells［J］. Natural gas industry，2017，37（4）：89-97（in Chinese））.

［8］ 祝效华，董亮亮，童华，等. 拉弯复合载荷作用下的 API 短圆套管螺纹力学行为［J］. 石油学报，2013，34（1）：157-163.（ZHU Xiaohua，DONG Liangliang，TONG Hua，et al. Mechanical behaviors of short-round thread of the API casing under combined load of stretching and bending moment［J］. Acta petrolei sinica，2013，34（1）：157-163（in Chinese））.

［9］ 王志寰，李成兵，赵明建，等. 井眼弯曲段 API 油套管长圆螺纹力学分析及仿真［J］. 塑性工程学报，2019，26（2）：317-323.（WANG Zhihuan，LI Chengbing，ZHAO Mingjian，et al. Mechanical analysis and simulation for long-thread of API tubing and casing at the curved portion of borehole［J］. Journal of plasticity engineering，2019，26（2）：317-323（in Chinese））.

［10］ 赫连长林. 超高抗扭钻杆接头螺纹研究［D］. 成都：西南石油大学，2015.

［11］ 任辉. API 石油钻杆接头应力分析及结构改进研究［D］. 上海：华东理工大学，2011.

［12］ 任辉，高连新，鲁喜宁. 新型双台肩钻杆接头研究与应用［J］. 石油机械，2011，39（3）：63-66.（REN Hui，GAO Lianxin，LU Xining. Research and application of new double shoulder drill pipe joint［J］. China petroleum machinery，2011，39（3）：63-66（in Chinese））.

［13］ 张攀，夏换，周宝库，等. 弯曲变形对钻杆接头螺纹粘扣的影响研究［J］. 石油机械，2013，41（10）：21-24.（ZHANG Pan，XIA Huan，ZHOU Baoku，et al. Effects of bending deformation on drillpipe joint thread gluing［J］. China petroleum machinery，2013，41（10）：21-24（in Chinese））.

［14］ 钢铁研究总院. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法：GB/T 2281—2010［S］. 北京：中国标准出版社，2010.

［15］ 王琍，张汝忻，邹家祥，等. API 圆螺纹套管接头应力场分布试验［J］. 北京科技大学学报，2000，22（6）：555-558.（WANG Li，ZHANG Ruxin，ZOU Jiaxiang，et al. Experimental research of stress field distribution on API round thread casing connection［J］. Journal of University of Science and Technology Beijing，2000，22（6）：555-558（in Chinese））.

（编辑　黄崇亚）